

文章编号:1000-582X(2007)07-0046-04

汽车火花点火系统电磁干扰的抑制方法

汪泉弟¹,刘春艳¹,俞集辉¹,刘青松²,李彬²

(1. 重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030;

2. 国家客车质量监督检验中心,重庆 401122)

摘要:汽车发动机由高电压电火花点火,点火过程产生的电磁波辐射对车载无线电接收机及周围电磁环境都会造成电磁干扰。汽车点火系统对外的电磁干扰主要来源于火花塞和高压点火线,通过建立火花塞的等效电路模型,研究了流过火花塞气隙的点火脉冲电流 i_p 与高压点火线上点火电流 i 之间的传输函数 $G(\omega)$,仿真分析比较了不同阻值的电阻型火花塞和电感型火花塞传输函数的幅频特性,从而在不影响点火性能的情况下,获得抑制汽车火花点火系统电磁干扰的有效方法,为汽车电系的电磁兼容设计提供有价值的理论参考。

关键词:汽车点火系统;电磁干扰;火花塞;高压点火线

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

随着现代电子技术在汽车上的大量应用,汽车上的电子产品越来越多,它们的增加使得汽车的电磁兼容问题日渐凸现出来。汽车电磁兼容性研究就是要保证汽车在运行过程中,车上的各类电子电气设备互不干扰,能安全可靠地工作^[1-2]。

世界发达国家以及各大汽车制造商都很重视汽车的电磁兼容性研究,制定了很多相应的国际标准和行业标准^[3-4]。由于我国汽车工业的发展滞后于世界发达国家,因此,目前国内汽车电磁兼容性的研究主要指汽车电磁兼容的测试,对电磁兼容问题也多采用事后检测、解决的办法^[5]。

汽车电系中存在着多种形式的电磁干扰源,干扰电磁波通过传导和辐射对车载电子设备产生不同程度的干扰。汽车电系内产生干扰电磁波最强的是火花点火系统^[6]。所以,分析研究火花点火系统电磁干扰的形成机理,采取切实有效的抑制措施,提高火花点火系统的电磁兼容性设计是尤为重要的。

1 火花点火系统电磁干扰的形成

图1为汽车发动机火花点火系统的电路示意图。点火系统的电磁干扰主要来源于高压点火线、火花

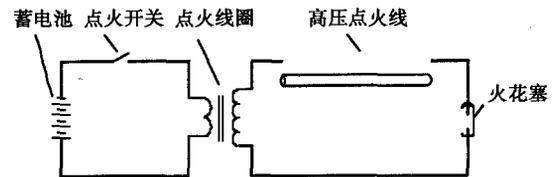


图1 汽车发动机火花点火系统电路示意图

塞和点火线圈等几个部件。当次级电路电压达到火花塞气隙击穿电压时,火花塞间隙被击穿,储存于火花塞分布电容中的能量迅速释放,放电时间极短,仅数微秒,但形成的放电电流则非常大,可达几十安培,这个过程称为电容放电过程。这一阶段的放电使次级电路的电压和电流形成陡峭的脉冲形式,这种宽带脉冲通过裸露的高压点火线对外辐射电磁波,造成周围环境的电磁干扰。随后,另一部分储藏在次级线圈电感中的能量将维持放电,其特点是时间较长,为几毫秒,放电电流约几十毫安,这一过程称为电感放电(火花尾),该电流使气缸内的燃料得到充分燃烧,以保证点火可靠。可见需要抑制的是第一阶段的电容放电电流,该电流为宽带脉冲电流,带宽在0.15~1 000 MHz范围,是30~300 MHz甚至更高频无线电的主要干扰源。

由于火花塞高压放电引起的电磁干扰主要是通过高压点火线向外辐射的,因此高压点火线此时成为干

收稿日期:2007-03-19

基金项目:重庆市自然科学基金计划资助项目(CSTC,2006BA1065)。

作者简介:汪泉弟(1954-),女,重庆大学副教授,博士,主要从事电磁场理论及应用研究,(Tel) 023-65112636;

(E-mail) wangquandi@yahoo.com.cn。

扰源的发射天线。天线的辐射功率与天线的激励电流的平方成正比^[7], 也就是说高压点火线上的电流越大, 对外辐射的功率也就越大, 造成的电磁干扰越强。因此通过减小高压线上的点火电流, 可从源头上抑制点火系统对外的电磁干扰^[8]。

2 火花塞等效模型

目前抑制点火系统电磁辐射的措施是将电阻体植入火花塞中, 图2是常用的电阻型火花塞结构图。

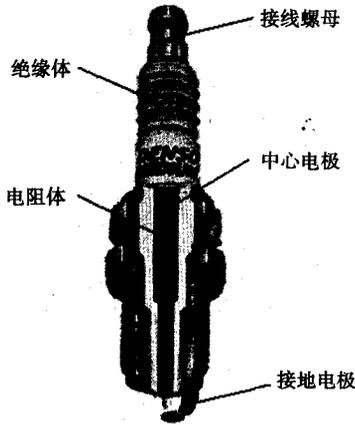


图2 火花塞结构示意图

根据火花塞的结构进行简化, 可得简化后的结构模型和等效电路模型, 如图3所示。

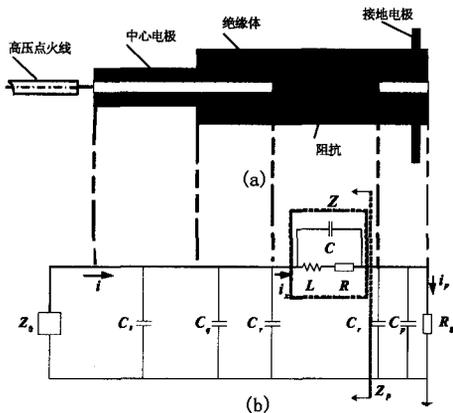


图3 火花塞简化结构模型(a), 火花塞等效电路模型(b)

图3(b)中, $Z_0 \cong \sqrt{R_0/sC_0}$ 为高压点火线特性阻抗, R_0 和 C_0 分别表示单位长度高压线的串联电阻和并联电容; C_s 为火花塞中心电极对接地外壳的分布电容; C_q 、 C_p 为火花塞电极的同轴分布电容; C_r 为阻尼阻抗对地分布电容; R_g 为火花塞空气间隙的等效电阻; Z 为植入火花塞的等效阻尼阻抗, 其复频域形式为

$$Z = \frac{R + sL}{1 + sC(R + sL)}, \quad (1)$$

由节点电流法有^[9]

$$\left. \begin{aligned} s(C_s + C_q + C_r)V_1 + I_x(s) &= I(s) \\ s(C_r + C_p)V_2 + I_p(s) &= I_x(s) \\ I(s) &= -\frac{V_1}{Z_0} \\ I_x(s) &= -\frac{V_2}{Z_p} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

于是可以得

$$I(s) = \frac{I_p(s)}{[1 + s(C_s + C_q + C_r)Z_r][1 + s(C_r + C_p)Z_p]}, \quad (3)$$

其中, Z_p 是从等效电路模型的不同端口看进去的等效阻抗, 如图3(b)所示。

$$Z_p = Z + \frac{Z_0}{1 + s(C_r + C_q + C_s)Z_0}, \quad (4)$$

令 $G(s)$ 为火花电流 $I_p(s)$ 与点火电流 $I(s)$ 的传输函数, 考虑到在 30 MHz 到 1 GHz 的频率范围有 $s(C_r + C_p)Z_p \gg 1$ ^[10], 于是可得简化后的传输函数

$$G(s) = \frac{1}{[1 + s(C_q + C_r + C_s)Z_0]s(C_r + C_p)Z_p}, \quad (5)$$

因此式(3)可写成

$$I(s) = G(s)I_p(s). \quad (6)$$

下面对电阻型火花塞和电感型火花塞的传输函数分别进行讨论。

1) 电阻型火花塞

采用电阻型火花塞时, $L = 0$, 火花塞的等效阻尼

阻抗 $Z = \frac{R}{1 + sCR}$, 因此

$$Z_p = \frac{R}{1 + sCR} + \frac{Z_0}{1 + s(C_r + C_q + C_s)Z_0},$$

令

$$C_u = (C_r + C_q + C_s); \quad \omega_{Rq} = \frac{C_0}{R_0 C_u^2},$$

$$\omega_q = \frac{1}{C_u R}; \quad \omega_d = \frac{1}{CR}; \quad \omega_R = \frac{C_0}{R_0 C_s^2}$$

于是可得传输函数的幅频特性

$$G(\omega) = |G(j\omega)| = \frac{C_s}{C_r + C_p} \times \frac{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_d}\right)^2\right)\left(\frac{\omega_R}{2\omega} + \left(1 - \sqrt{\frac{\omega_R}{2\omega}}\right)^2\right)^2}}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_q}\right)\sqrt{\frac{\omega_{Rq}}{2\omega}}\right)^2 + \left(1 + \sqrt{\frac{\omega_{Rq}}{2\omega}}\right)^2\left(\frac{\omega}{\omega_q}\right)^2}}$$

2) 电感型火花塞

采用电感型火花塞时,火花塞的等效阻尼阻抗见(1)式,其传输函数的幅频特性为

$$G(\omega) = |G(j\omega)| = \frac{C_s}{C_r + C_p} \times \frac{\sqrt{[(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R^2] \left(\frac{\omega_R}{2\omega} + \left(1 - \sqrt{\frac{\omega_R}{2\omega}} \right)^2 \right)}}{\sqrt{A + B}}$$

其中

$$A = \left(1 - \omega^2 C_u L + C_u R \sqrt{\frac{\omega_{Rq} \omega}{2}} + \omega^2 C_u L \sqrt{\frac{\omega_{Rq}}{2\omega}} \right)^2$$

$$B = \left(C_u R \omega + C_u R \sqrt{\frac{\omega_{Rq} \omega}{2}} - \omega^2 C_u L \sqrt{\frac{\omega_{Rq}}{2\omega}} \right)^2$$

由(3)式可知, $I(\omega) \propto I_p(\omega)$, 而火花电流 i_p 是由火花塞间隙的特性决定的,所以可以通过研究传输函数 $G(\omega)$ 的幅频特性,了解如何改变火花塞等效电路中的阻尼阻抗参数来影响高压线上的点火电流 i_o 。

3 仿真结果与分析

为了减少电容放电时的冲击电流,火花塞中阻尼阻抗放置的位置离气隙非常近,这部分同轴分布电容 C_p 很小,所以在仿真过程中可以忽略。

在本文的仿真计算中,火花塞和高压点火线的有关参数取值见表1^[10]。

表1 仿真计算参数表

参数	设置
R	<20 kΩ
L	60 μH
C	0.7×10^{-3} pF
C_r	1.8 pF
C_q	3.5 pF
C_s	0.7 pF
R_0	190 Ω/cm
C_0	0.1 pF/cm
高压点火线长度	25 cm

3.1 电阻型火花塞与无电阻火花塞比较

分别仿真计算了无电阻火花塞与阻值为5 kΩ、10 kΩ的电阻型火花塞的传输函数 $G(\omega)$, 计算结果如图4所示。

比较图4(a)与图4(b),可以看出将电阻体置入火花塞后,减小了传输函数 $G(\omega)$ 的幅值,在高频段尤其明显,因此高压点火线的电磁波辐射将被有效抑制,这与其它文献的实验结果一致。从图4(b)中还可看到,电阻型火花塞的电阻值越大,抑制效果越好,但是,

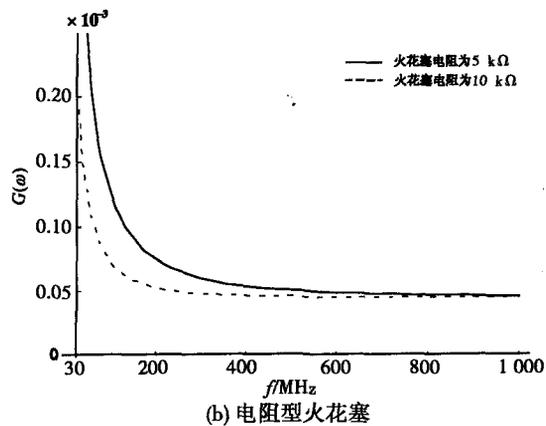
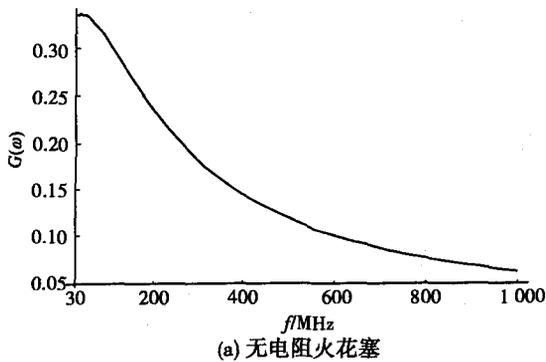


图4 计算结果

由于电阻的存在将衰减点火能量,为了保证点火系统工作的可靠性,所以电阻阻值也不宜过高,一般不超过20 kΩ^[11]。

3.2 电阻型火花塞与电感型火花塞比较

由前面的仿真结果还可看出,当频率超过600 MHz后,阻值大小对传输函数 $G(\omega)$ 的影响不大。为了进一步研究 $G(\omega)$ 的特性,本文对电阻型火花塞和电感型火花塞的传输函数也作了比较,仿真结果见图5。

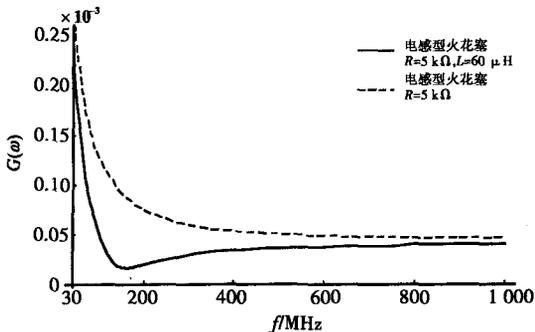


图5 电阻型火花塞和电感型火花塞比较

从图5中可以看出,火花塞的电感可以降低传输函数 $G(\omega)$ 的幅值,这是因为电感上的电流不能突变,电感对脉冲放电电流有扼流作用。火花塞的电感可以降低传输函数 $G(\omega)$ 的值,表明在其他条件相同的情

况下,电感型火花塞对干扰的抑制更有效。

4 结 论

通过汽车点火系统的等效电路模型,研究了火花电流 i_p 与高压线上的点火电流 i 之间的传输函数 $G(\omega)$,分析了电阻型火花塞和电感型火花塞的传输函数随阻尼阻抗参数变化的频域特性,结果表明:

1)在火花塞中植入阻尼阻抗后,传输函数明显减小,因高压点火线上的电容放电电流减少了,从而能有效抑制点火系统对外的电磁辐射干扰。

2)与电阻型火花塞相比,电感型火花塞对电磁干扰的抑制能力更强。但电感型火花塞的体积和重量较大,因此在某些应用场所受到限制。

由于在仿真研究中,仅改变了阻尼阻抗的参数,对气隙击穿电压、火花电流 i_p 没有影响,所以并不影响点火系统的其它性能。

参考文献:

- [1] 余召锋,徐鸣谦,吴伟.汽车电磁兼容性及其仿真预测技术[J].汽车研究与开发,2003(2):38-41.
[2] 徐立.我国汽车电磁兼容技术发展状况[J].安全与电磁

兼容,2003(1):35-37.

- [3] VIPUL PATEL, MARK STEFFKA. Vehicular spark ignition systems radiated emissions and reception performance [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 2005(5): 19-23.
[4] 林艳萍.汽车电磁兼容实验室及测试技术[J].安全与电磁兼容,2003(1):1-7.
[5] 余召锋,徐鸣谦.汽车电磁兼容性系统方法[J].汽车研究与开发,2002(5):54-57.
[6] 戴焯,周伟.汽车电系电磁干扰源[J].武汉汽车工业大学学报,1999,21(4):4-7.
[7] 江贤祚.天线原理[M].北京:北京航空航天大学出版社,1993.
[8] 马西奎.电磁场理论及应用[M].西安:西安交通大学出版社,2000.
[9] 邱关源,罗先觉.电路[M].北京:高等教育出版社,2006.
[10] FUJIWARA O. Calculation of Ignition Noise Level Caused by Plug Ga PBreakdown [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1982,24(2):26-32.
[11] 刘新亮.汽车电器的电磁兼容[J].汽车电器,2001,6:2-7.

On Suppressing Electromagnetic Interference Caused by Automobile Spark-ignition System

WANG Quan-di¹, LIU Chun-yan¹, YU Ji-hui¹, Liu Qing-song², Li Bin²

- (1. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. National Coach Quality Supervision and Inspection Center, Chongqing 401122, China)

Abstract: Electromagnetic wave radiation, which is caused by high-voltage electric spark igniting the automotive engine, has electromagnetic interference to car radio systems and ambient electromagnetic environments. Spark plugs and high-voltage ignition wire are main interfering sources of the automobile spark-ignition systems. The equivalent circuit model of spark plugs is set up, the transfer function $G(\omega)$ between the ignition pulse current i_p which flows in the spark plug gap and the ignition current i which flows in the high-voltage ignition wire is analyzed, and the transfer function of resistor spark plugs and inductor spark plugs with different resistance are simulated. The method on suppressing electromagnetic interference caused by automobile spark-ignition system is given and it has no influence on igniting characteristics.

Key words: automobile ignition system; electromagnetic interference (EMI); spark plugs; high-voltage ignition wire

(编辑 张小强)